

Modelado de algunos elementos de las micro redes para propósitos de protección

Michell Carmona Olarte

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniera Electricista

Director
Juan José Mora Flórez

Codirector
Andrés Ricardo Herrera

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Facultad de Ingenierías
Programa de Ingeniería Eléctrica
Pereira, 29 de marzo de 2019



Nota de Aceptación

Juan José Mora Flórez. Director

Jurado

Pereira, 29 de marzo de 2019

Modelado de algunos elementos de las micro redes para propósitos de protección
©Michell Carmona Olarte

Pereira, 29 de marzo de 2019
Programa de Ingeniería Eléctrica.
Universidad Tecnológica de Pereira
La Julita. Pereira(Colombia)
TEL: (+57)(6)3137122

www.utp.edu.co

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/index.html>*

Agradecimientos

A mis padres y hermanos por su apoyo, por la fé que me han tenido y por hacer de mi una personas integra. A mi director y co-director de proyecto de grado por su apoyo, dedicación, comprensión y aportes. A mis compañeros y amigos que de alguna u otra forma me animaron y motivaron.

Resumen

El presente trabajo se encuentra dividido en tres partes principales. En la primera parte se establecen los conceptos básicos sobre los modelos de falla para fuentes de generación distribuida, líneas de transmisión y cargas. También, se establece la razón por la cual estos modelos son importantes actualmente para la implementación de estrategias de protecciones. Adicionalmente, se presentan algunos conceptos de generación eólica, fotovoltaica, microhidroeléctricas, cargas y líneas de transmisión. En la segunda parte se muestran y comparan los modelos establecidos de cada elemento, basados en los documentos existentes presentados en la bibliografía. Posteriormente, se establece y simula el modelo más empleado de cada fuente. Por último, se muestra el desempeño de cada uno de los modelos seleccionados ante falla en la microred y se presenta y analiza el comportamiento de la corriente inyectada.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Justificación	3
1.4. Metodología	3
1.5. Estructura del trabajo de grado	6
2. Aspecto teórico básico	7
2.1. Marco teórico	7
2.2. Marco conceptual	9
2.3. Estado del arte	10
3. Propuesta de modelado	13
3.1. Elemento 1: Fuentes de generación distribuida	13
3.1.1. Fuentes eólicas	13
3.1.1.1. WTG tipo 1	15
3.1.1.2. WTG tipo 2	16
3.1.1.3. WTG tipo 3	17
3.1.1.4. WTG tipo 4	19
3.1.2. Fuentes fotovoltaica	21
3.1.3. Micro hidroeléctricas	24
3.2. Elemento 2: Líneas de transmisión	24
3.2.0.1. Modelos línea corta	24
3.2.0.2. Modelo de línea media	25
3.2.0.3. Modelo de línea larga	25

3.3. Elemento 3: Cargas	26
3.3.0.1. Cargas residenciales, industriales y comerciales	26
3.3.0.2. Cargas electrónicas	28
4. Implementación de los modelos de fuente analizados	31
4.1. Implementación del modelo de WTG y microhidroeléctrica tipo 3 ante perturbación	31
4.2. Implementación del modelo de un IIDG ante perturbación	34
5. Conclusiones	39
A. Parámetros de los modelos de carga de fuente de alimentación	41
B. Parámetros generador de inducción	45
C. Parámetros convertidor del <i>IIDG</i>	47

Índice de figuras

3.1. Parametros GI [1]	14
3.2. Conexión a la red del WTG tipo 1 [1]	15
3.3. Conexión a la red del aero generador tipo 2 [1]	17
3.4. Conexión a la red del WTG tipo 3 [1]	18
3.5. Conexión a la red del WTG tipo 4 [1]	20
3.6. Comparación tipos de WTG	21
3.7. Elementos de la conexión de un PV [2]	21
3.8. Comportamiento de la corriente inyectada por el sistema PV en falla [3]	22
3.9. Representación RL de linea de transmisión	25
3.10. Representación PI de linea de transmisión	26
3.11. Parámetro del modelo de carga dependiente de voltaje [4]	27
3.12. Parámetro del modelo de carga de fuente de alimentación [30]	29
4.1. modelo en simulink del WTG3	32
4.2. Simulación corriente de falla tipo 3	33
4.3. Comparación del comportamiento de la corriente de falla	34
4.4. Modelo para una DG con interfaz de inversor	35
4.5. Corriente inyectada por una DG en falla	35
4.6. Comparación del comportamiento de la corriente de falla de un IIDG .	36
4.7. Voltaje de falla	37

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

En Colombia, gracias a la ley 1715 de 2014 y a la resolución CREG 030 DE 2018, se ha impulsando el uso de nuevas fuentes de generación distribuida (GD) como son la eólica, solar, baterías, entre otras. La integración de estas fuentes produce cambios en la estructura de la red de distribución, ya que pasa de ser un sistema radial a un sistema anillado o incluso considerarse una microred, al momento de que estas fuentes entran en funcionamiento. Lo anterior provoca que las estrategias actuales de protecciones no funcionen correctamente y este sistema presente diversas fallas frente a los diferentes modos de operación que generan estos nuevos elementos [5][6].

Una nueva red de distribución o microred requiere de un sistema de protección, para ello existen diferentes estrategias de protecciones que han sido propuestas [7]. Al momento para implementar la protección de un sistema con GD existen varios factores que influyen en estas estrategias como el flujo de la corriente bidireccional que se genera, la localización de estas fuentes, el tipo de modelo de cada fuente y la conexión de la misma con la red, entre los más importante a tener en cuenta [8][9].

Todo sistema eléctrico esta propenso a fallas, lo cual hace necesario la implementación de una estrategia de protección. De esta forma, es importante analizar los factores de cada modelo de la GD que determinan el comportamiento del sistema y los modos de operación durante la falla [10].

Considerando lo anteriormente expuesto, con esta investigación se analiza el comportamiento de los diferentes modelos de fuentes de GD ante una falla y se adaptan a las microredes para posteriormente determinar su posible influencia en algunas estrategias de coordinación de protecciones.

Este documento servirá como soporte para futuras investigaciones, para la implementación de estrategias de protección adecuadas en una red de distribución que contenga elementos de GD, permitiendo la operación correcta frente a diferentes modos de operación que estén influenciados por el tipo de DG conectada a la red.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Analizar e implementar los modelos existentes de las fuentes de generación distribuida para posteriores estudios de su influencia en algunas estrategias de coordinación de protecciones.

1.2.2. Específicos

- Revisar los diferentes modelos existentes en la literatura especializada asociados a fuentes de generación distribuida.
- Analizar y seleccionar los modelos adecuados que pueden ser adaptables a los estudios de coordinación de protecciones.
- Implementar los modelos seleccionados.
- Validar el comportamiento de los modelos implementados para posteriores estudios de coordinación de protecciones.

- Documentar los procedimientos y resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

1.3. Justificación

La protección de redes de distribución con elementos de GD en lo que se considera como una microred, ya sea conectada a la red principal o desconectada de la misma, representan un reto para estos sistemas, debido a que las redes están sometidos a diferentes modos de operación. El funcionamiento correcto de un sistema de protecciones no solo garantiza que los equipos estén protegidos, sino también el funcionamiento adecuado de la red.

Por otro parte, en los documentos encontrados en la literatura especializada de protecciones en micro redes, se plantea que de acuerdo con el modelo que se implemente para estos elementos de generación distribuida, se ve afectado el comportamiento de la magnitud del flujo de corriente, lo que hace que el sistema de protecciones no opere correctamente ante una falla [8] [11]. Por esta razón, hace necesario analizar sus características y el modo de conexión de los diferentes modelos a la red.

Teniendo en cuenta lo anterior, con este proyecto determina el comportamiento de estas nuevas fuentes antes situaciones de falla, para servir como base en futuras investigaciones. También, contribuirá a ampliar el conocimiento en el tema de micro redes en Colombia para promover el uso de fuentes de generación limpia garantizando el correcto funcionamiento.

1.4. Metodología

La metodología se plantea considerando los objetivos propuestos. A continuación, se presenta una descripción de las actividades a realizar y que están asociadas a cada objetivo específico como propuesta metodológica:

- Para alcanzar el objetivo específico “Revisar los diferentes modelos existentes en la literatura especializada asociados a fuentes de generación distribuida”, se pro-

ponen las siguientes actividades:

a. Búsqueda de información: Esta actividad está asociada con la búsqueda de información relacionada con el objetivo del trabajo en las diferentes bases de datos a las cuales se tiene acceso, como IEEE Explore, ScienceDirect, entre otras.

b. Selección de la información: Se debe organizar y seleccionar adecuadamente la información de acuerdo a los diferentes modelos existentes en la literatura especializada para su posterior análisis.

c. Estudio y discusión de los modelos: Se realiza un estudio detallado de cada uno de los documentos encontrados en la literatura especializada. Estos modelos se discuten con los directores de la investigación, teniendo en cuenta cuales pueden ser los más relacionados con el objetivo del proyecto.

- Referente al objetivo específico “Analizar y seleccionar los modelos adecuados que pueden ser adaptables a estudios de coordinación de protecciones.” Se plantea las siguientes actividades:

d. Análisis de los modelos: Se hará un análisis comparativo de las características de cada modelo propuesto en los documentos seleccionados.

e. Criterios de selección de los modelos: Se tendrán en cuenta algunas variables de comparación como son la facilidad de implementación del modelo, su adecuada descripción, entre otros. para elegir los más acordes a los estudios de coordinación de protecciones.

f. Elección del modelo: De acuerdo a los criterios anteriores se discutirá con los directores del proyecto los modelos más adecuados para su posterior implementación.

- Respecto al objetivo específico “Implementar y adaptar los modelos seleccionados.” Se sugieren las siguientes actividades:

g. Selección del software de simulación: Se debe seleccionar adecuadamente el programa de simulación a ser usado durante el desarrollo del proyecto. Algunos programas como Matlab, Neplan o alguno similar serán evaluados. Con el propósito de seleccionar aquel que garantice un fácil manejo y una correcta simulación

de los modelos.

h. simulación de los modelos: En esta etapa se procede a montar los modelos y a analizar en el software escogido para su posterior análisis.

- En relación al objetivo específico “Validar el comportamiento de los modelos implementados para posteriores estudios de coordinación de protecciones.” Se tratan las siguientes actividades:

i. Extracción de datos: Se analizan los resultados de simulación en cada modelo implementado y se obtiene los datos mas relevantes de cada una de ellas.

j. Análisis comparativo: Se tendrá en cuenta la información descrita en los modelos de cada documento para relacionarla con los resultados arrojados en cada simulación.

k. Confirmar la adaptabilidad de los modelos: Se verificará la veracidad o no de los resultados de las simulaciones con lo descrito en los modelos.

- Finalmente, para llevar a cabo el objetivo específico “Documentar los procedimientos y resultados obtenidos a lo largo de la investigación.” Se establecen las siguientes actividades.

l. Documentación de la investigación: Se espera redactar un documento donde se describa detalladamente los procedimientos y resultados de esta investigación, plasmando cada uno de los pasos realizados para llegar a la elección del modelo que más se adapta a la red de distribución para facilitar el estudio de coordinación de protecciones

1.5. Estructura del trabajo de grado

El trabajo de grado está organizado de la siguiente forma. En el Capítulo 2 se definen las siglas y conceptos básicos referentes a los modelos de las fuentes de generación distribuida que se van a emplear (eólica, fotovoltaica y micro hidroeléctricas), las líneas de transmisión y las cargas. Posteriormente en el Capítulo 3 se analiza el comportamiento de los modelos existentes de los elementos ya mencionados ante una falla, el análisis de las fuentes GD se realiza a través de simulaciones que permiten visualizar de una mejor manera lo que ocurre en las diferentes fuentes al momento de una perturbación. Luego, en el Capítulo 4 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas, para que los resultados obtenidos pudieran ofrecer conclusiones claras. Finalmente se presentan las conclusiones en el Capítulo 5.

Capítulo 2

Aspecto teórico básico

2.1. Marco teórico

A lo largo de este trabajo se hará uso de las siguientes siglas y conceptos básicos, los cuales se describen a continuación.

- WTG (*Wind turbine generator*): Un aerogenerador o turbina eólica es un dispositivo generador de energía que es impulsado por la energía cinética del viento.
- GI (*Induction generator*): Un generador de inducción o generador asíncrono es un tipo de generador eléctrico de corriente alterna (CA) que se basa en la ley de inducción electromagnética de Faraday para generar electricidad. Los generadores de inducción son útiles en aplicaciones como micro centrales hidroeléctricas, turbinas eólicas.
- SCGI (*Squirrel cage induction generator*): Es un tipo de aerogenerador que utiliza una máquina jaula de ardilla y el cual de acuerdo a su conexión con la red puede brindar la posibilidad de ajustar o mantener la velocidad de operación del aerogenerador.
- Microred: Una red más pequeña que también está vinculada al sistema de suministro eléctrico más grande.

- GD (*Generación distribuida*): La generación distribuida se refiere a una variedad de tecnologías que generan electricidad en o cerca de donde se utilizará, como paneles solares, pequeños aerogeneradores, celdas de combustible de gas natural, energía hidroeléctrica.
- IIDG (*inverter interfaced distributed generation definition*): Dispositivos de generación distribuida que cuenta con un convertidor como interfaz para conectarse a la red eléctrica.
- Convertidor DC-AC: Es un sistema electrónico de potencia que produce una salida AC a partir de una entrada DC.
- Inversor: Es un dispositivo electrónico, cuya función es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario.
- R_{ext} : Resistencia externa.
- R_{cb} : Resistencia de protección crowbar para el WTG tipo 3
- PCC (*Punto de acoplamiento en común*): Nodo en el cual van conectados varios elementos de la micro red.
- KW: *Kilo Watt*
- PU: unidad en por unidad.
- v: Unidad de voltaje *Volt*.
- A: Unidad de corriente *Amper*.
- s: Unidad de tiempo *segundo*.

2.2. Marco conceptual

- Generación eólica: Es una fuente de energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores, "molinos de viento" de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica.
- Generación fotovoltaica: Es una fuente de energía renovable que transforma la radiación solar en electricidad mediante el uso de paneles solares.
- Micro hidroeléctricas (*PCH*): Tiene la misma función de una central hidroeléctrica que es transformar la energía hidráulica del agua en energía eléctrica pero de menor capacidad, para centro américa se considera que es una micro central si la potencia que entrega esta entre 10KW a 50KW.
- Tiempo transitorio: Periodo de transición durante el cual tensiones y corrientes varían hasta llegar a la condición de equilibrio impuesta por la red.
- Líneas de transmisión: Una línea de transmisión eléctrica es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, está constituida por: conductores, estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes entre aisladores y estructuras de soporte, y cables de guarda; es de suma importancia el estudio de las características eléctricas en los conductores de las líneas, estas abarcan los parámetros impedancia y admitancia, la primera esta conformada por la resistencia y la inductancia uniformemente distribuidas a lo largo de la línea y se representa como un elemento en serie. La segunda esta integrada por la susceptancia y la conductancia y en este caso se representa como un elemento en paralelo, la conductancia representa las corrientes de fuga entre los conductores y los aisladores, esta es prácticamente despreciable por lo que no es considerado un parámetro influyente.
- Carga: La carga de un sistema de distribución de energía eléctrica es la parte terminal del sistema que convierte la energía eléctrica a otra forma de energía. Por ejemplo, un motor eléctrico convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Más aún, este concepto incluye a todos los artefactos que requieren de energía

eléctrica para funcionar o realizar un trabajo.

2.3. Estado del arte

En la actualidad se esta fomentando el uso de fuentes de generación alternativas [5], lo cual conlleva modificaciones a la red de distribución como se menciona anteriormente. Las implicaciones que ocasionan estos nuevos elementos en la red originan un reto al momento de implementar el sistema de protecciones, por este motivo, muchos autores buscan estrategias para brindar una mayor confiabilidad a este sistema proponiendo nuevos métodos y modelos. Algunos analizan las características de diferentes modelos de turbinas eólicas donde analizan las variaciones que producen en la red de distribución [10] [12]. Igualmente, la implementación de fuentes de energía fotovoltaica en la red de distribución genera problemas en la respuesta de los relés de sobre corriente, frente a una contingencia [8] [13].

Para la implementación de estas fuentes en la red de distribución, algunas veces se dispone de convertidores back to back, los cuales evitan que suministren altas corrientes durante una falla, evitando que los equipos de protección la detecten, dificultando el correcto funcionamiento de un sistema de protección. [14]. También, hay que tener en cuenta que para adaptar un esquema de coordinación de protecciones a la red de distribución y garantizar que sea eficiente, se debe analizar que algunos elementos de GD contienen inversores monofásicos, los cuales proporcionan un acondicionamiento de energía para inyectar energía a la red y al ser implementados, exigen un seguimiento de muchas variables y generan un gran impacto sobre la red de distribución, por lo cual es importante estudiar si realmente es indispensable utilizar estos tipos de elementos junto con las fuentes de GD [15].

Considerando lo anterior, se observa que es necesario el análisis de los diferentes modelos que existen de las fuentes de energía alternativa, con el fin de analizar el efecto en el comportamiento de la corriente del sistemas ante una falla.

En la literatura se encuentran varias topologías de aerogeneradores que se pueden implementar, como las mencionadas en [1] [16] [17] donde estudian los diferentes tipos de aerogeneradores disponibles actualmente, además presentan su comportamiento durante una perturbación y las características de cada uno, aunque son parecidas, no son

exactamente iguales. Por lo que en [18] busca analizar el comportamiento de cada modelo ante diferentes sistemas de prueba, con la finalidad de encontrar el mas ideal para la implementación, el resultado fue la topología tipo 3 y en [19] describen el procedimiento para llegar a la expresión que modela el comportamiento de la corriente de este aerogenerador en el momento que ocurre una falla.

La generación fotovoltaica y algunas topologías de micro hidroeléctricas y aerogeneradores implementan un convertidores DC-AC para entregar energía eléctrica a la red de distribución[2], este tipo de interfaz a la red (IIDG), es ampliamente utilizado debido a su flexible y rápido control proveniente de los dispositivos de electrónica de potencia que limitan la corriente a su máximo valor en caso de una falla, el cual es considerado como 2 veces el valor nominal del convertidor [3], donde la corriente de corto circuito depende principalmente de la estrategia de control aplicada sobre el inversor [20]. Por lo que en [3] [21] analizan el comportamiento durante una falla para así demostrar que estos tipos de generación se pueden modelar como una fuente trifásica de corriente controlada.

En el caso de micro hidroeléctricas, las topologías de implementación a la red son las mismas de los aerogeneradores mencionadas en [22], pero las más modernas implementan los dispositivos de electrónica de potencia (IIDG).

Para la simulación de una micro red también se tienen en cuenta los modelos adecuados de cargas y líneas de transmisión, en este caso se implementarán para el análisis de fallas. Según[23] las líneas de transmisión se puede modelar como una conexión RL en serie por cada fase solamente o teniendo en cuenta el efecto capacitivo, esto va a depender de la longitud de la línea a implementar. Por otro lado, las cargas no lineales se pueden modelar como una fuente de corriente. También, en [4] mencionan que las cargas usualmente empleadas en micro red son residenciales, comerciales e industrial, las cuales usan el modelos de dependiente de voltaje y las cargas electronicas según [30] son son modelas con un circuito RLC.

En el capítulo 3 se complementara la información para cada modelo de fuentes de generación distribuida, líneas de transmisión y cargas. Explicándolas mas detalladamente y analizado su comportamiento durante una falla, teniendo como referencias citadas para este trabajo.

Capítulo 3

Propuesta de modelado

En este capítulo se presentaran las ecuaciones que modelan el comportamiento de la corriente de corto circuito para cada tipo de aero generador, micro hidroeléctrica y panel fotovoltaico. También, se mencionara sus respectivas ventajas y desventajas analizando cada uno; con el objetivo encontrar el mas empleado para cada tipo de generación e implementarle el modelo mas usado para análisis de cortocircuito.

3.1. Elemento 1: Fuentes de generación distribuida

3.1.1. Fuentes eólicas

Para generar energía aprovechando el viento como recurso principal es necesario utilizar una turbina eólica o un WTG , el cual esta compuesto principalmente por las aspas, el gearbox y el generador eléctrico. En algunos tipos de WTG no sera necesario la implementacion del gearbox como se mostrara mas adelante [18].

Las turbinas eólicas se pueden clasificar en dos tipos: las de velocidad fija (tipo 1 y tipo 2) y velocidad variable (tipo 3 y tipo 4)[18]. Generalmente, estos tipos de turbinas eólicas implementan un generador de inducción (GI) como el mostrado en la figura 3.1 [16].

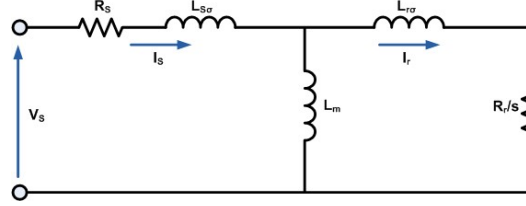


Figura 3.1: Parametros GI [1]

Donde:

R_s : Resistencia del estator.

R_r : Resistencia del rotor.

$L_{s\sigma}$: Inductancia del estator.

$L_{r\sigma}$: Inductancia del rotor.

L_m : Inductancia de magnetización.

Para encontrar el modelo del comportamiento de la corriente de falla en los diferentes modelos de WTG se definen los siguientes parámetros del GI referidos al estator mostrados a continuación :

V_s : Voltaje en los terminales del estator.

ω : Frecuencia angular.

α : Angulo del voltaje de fase.

σ : Factor de fuga.

Z'_s : Impedancia equivalente del generador referida al estator.

X'_s : Reactancia del estator.

T'_s : Constante de tiempo del estator.

T'_r : Constante de tiempo del rotor.

L'_r : Inductancia transitoria del rotor.

L'_s : Inductancia transitoria del estator.

Los parametros L_s y L_r se calculan de la siguiente manera:

$$L'_s = L_s o + \frac{L_r o * L_m}{L_r o + L_m}$$

$$L'_r = L_r o + \frac{L_s o * L_m}{L_s o + L_m}$$

Teniendo en cuenta los parámetros mencionados, se procedeá a describir cada modelo de aerogenerado y su respectivo comportamiento de la corriente ante una perturbación.

3.1.1.1. WTG tipo 1

a. Modelo propuesto

Este fue la primera generación de turbinas eólica de velocidad fija, la cual se conecta directamente a la red eléctrica y dispone de un SCGI , de un arrancador suave y un gearbox como se muestra en la siguiente figura: 3.2[16].

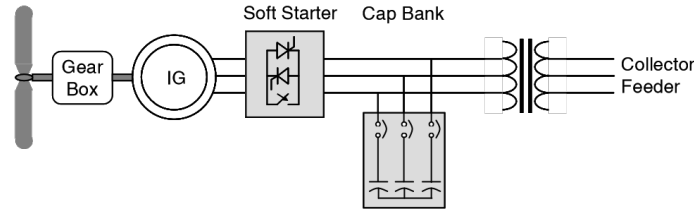


Figura 3.2: Conexión a la red del WTG tipo 1 [1]

Según [16] asumiendo una falla trifásica simétrica, el modelo para la corriente de corto circuito del WTG tipo 1 se puede describir mediante la ecuación 3.1, donde el valor de esta corriente va a depender de la impedancia del generador y la impedancia entre el lugar de la falla y los terminales del aerogenerador[1], para otras fallas únicamente va a cambiar el valor pico de la magnitud. La contribución de corriente de falla podría llegara a una magnitud de hasta 6 veces la corriente nominal en pu del generador[17].

$$I_{CC} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{Z'_s} \cdot (e^{\frac{-t}{T'_s}} \cdot \sin \alpha - (1 - \sigma) \cdot e^{\frac{-t}{T'_r}} \cdot \sen wt + \alpha) \quad (3.1)$$

con:

$$T'_r = \frac{L'_r}{R_r}$$

$$T'_s = \frac{L'_s}{R_s}$$

$$Z'_s = X'_s = w \cdot L'_s$$

b. Análisis de ventajas y desventajas

La principal ventaja de esta configuración según [18] es que se puede conectar directamente a la red mediante el uso de un arrancador suave. Por otro lado, según [1] un problema de esta maquina es el consumo de potencia reactiva del campo de excitación y la gran corriente que genera en el arranque, para mitigar estos efectos se emplea el arrancador suave, con el fin de magnetizar la maquina lentamente ya que se le debe suministrar potencia reactiva a través de dispositivos de compensación de reactivos. Por otro lado, esta configuración es muy poco utilizada ya que tiene una baja confiabilidad debido a que no aprovecha al máximo los picos de variabilidad del viento.[18].

3.1.1.2. WTG tipo 2

a. Modelo propuesto

Esta configuración de turbina eólica también cuenta con un generador de inducción jaula de ardilla con rotor devanado es muy parecida al tipo 1, con la única diferencia de tener una resistencia externa variable conectada al rotor cuya función permite controlar la velocidad, esta conexión se puede observar en la figura 3.3[16].

según [16] si en el momento de una perturbación no se le ejerce ningún control de velocidad, la corriente de corto circuito se comportara como la de un GI (igual al WTG tipo 1), pero si en ese momento se esta ejerciendo control sobre la velocidad, es decir la $R_{EXT} > 0$ la corriente de falla dependerá del valor que tenga la resistencia variable entre mas grande sea este valor de R_{EXT} menor será la magnitud de la corriente, el tiempo de la duración de la falla esta definido por el tiempo constante del rotor (T_r) .

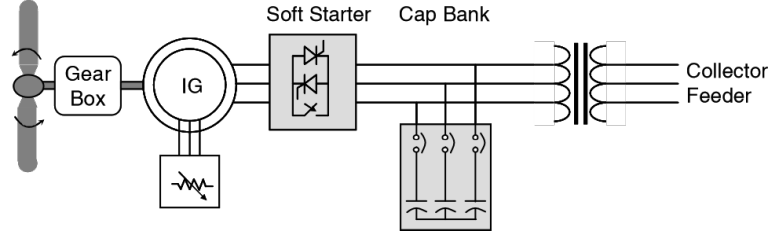


Figura 3.3: Conexión a la red del aerogenerador tipo 2 [1]

En [16][17] describen la expresión que representa el comportamiento de la corriente de este modelo durante una falla, la cual se muestra en la ecuación 3.2.

$$I_{CC} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{Z'_s} \cdot (e^{\frac{-t}{T'_s}} \cdot \sin \alpha - (1 - \sigma) \cdot e^{\frac{-t}{T'_r}} \cdot \sin wt + \alpha) \quad (3.2)$$

Con:

$$Z'_s = \sqrt{(X'_s)^2 + (R_{EXT})^2}$$

$$T'_r = \frac{L'_r}{R_r + R_{EXT}}$$

R_{EXT} : Es la resistencia externa del rotor.

b. Análisis de ventajas y desventajas

Al implementar una resistencia externa en el rotor permite controlar la velocidad en un rango por encima del 10 % [16], aunque es posible el control de velocidad este modelo no permite aprovechar del todo los picos de variabilidad del viento, debido a su corto rango de control de velocidad. [1].

3.1.1.3. WTG tipo 3

a. Modelo propuesto

Esta configuración cuenta con un generador de inducción doblemente alimentado y un convertido de potencia DC-AC conectado a los terminales del rotor, la función

de este convertidor consiste en desacoplar la turbina de la red para que así, la turbina pueda controlar su propia potencia activa y reactiva sin verse afectada por los fenómenos que ocurren en la red en operación normal y poder funcionar a una frecuencia diferente de la red aprovechando los picos de variabilidad del viento, mientras que los devanados del rotor están conectados directamente al sistema a la misma frecuencia de la red.[18] como se observa en la figura 3.4

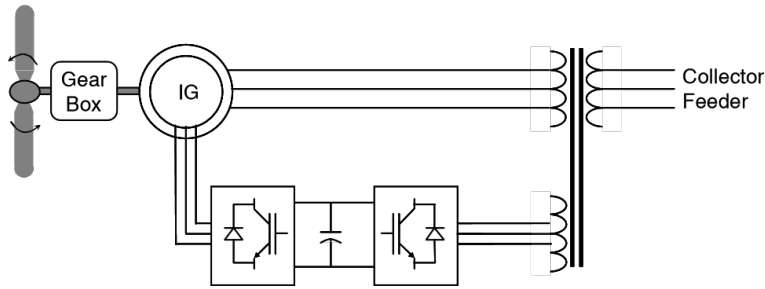


Figura 3.4: Conexión a la red del WTG tipo 3 [1]

El WTG tipo 3 cuenta con una protección Crowbar en el rotor, con el fin de proteger el convertidor cuando ocurre una falla en el sistema, está se corto circuita desviando la corriente, desconectando el esquema de protección y evitando daños en el convertidor, en ese momento el WTG actúa como un generador de inducción con una gran resistencia en el rotor [18].

En [16] explican el análisis del procedimiento para llegar a la expresión 3.3 que describe el comportamiento de la corriente de corto circuito de este modelo cuyo valor va a depender de los parámetros del generador de inducción, principalmente de las inductancias, esta ecuación es solo una aproximación cuando ocurre una falla en el peor escenario, el cual es en los terminales del estator, si la falla ocurre en un lugar mas alejado de los terminales, se debe tener en cuenta la impedancia que se genera entre la falla y los terminales del aerogenerador. También, en [19] llegan a la expresión que modela la corriente ante una falla, con la diferencia que la expresión esta en función de seno y el ángulo α está desfasado $\frac{\pi}{2}$, la podemos ver en la ecuación 3.4

$$I_{CC} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{Z'_s} \cdot (e^{\frac{-t}{T'_s}} \cdot \cos \alpha + (1 - \sigma) \cdot e^{\frac{-t}{T'_r}} \cdot \cos(\omega t + \alpha)) \quad (3.3)$$

$$I_{CC} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{Z'_s} \cdot (e^{\frac{-t}{T'_s}} \cdot \sin \alpha + (1 - \sigma) \cdot e^{\frac{-t}{T_r}} \cdot \sin(wt + \alpha)) \quad (3.4)$$

Donde:

$$Z'_s = \sqrt{(X'_s)^2 + (R_{CB})^2}$$

$$T'_r = \frac{L'_r}{R_r + R_{CB}}$$

R_{CB} : Resistencia de protección Crowbar

b. Análisis de ventajas y desventajas

según [18] esta configuración es una de las mas utilizadas debido a que presenta el mejor comportamiento de estabilidad y sus ventajas constructivas, de operación e instalación la hacen ideal en cualquier aplicación donde se requiera un aerogenerador, ademas los costos son menores en comparación con las otras turbinas eólica. Otra ventaja según [19] con la que cuenta esta configuración es que permite una variación de la velocidad entre el 25 y el 30 % lo que permite un amplio control de la potencia generada y un mayor aprovechamiento de los picos de variación del viento.

3.1.1.4. WTG tipo 4

a. Modelo propuesto

Este es un aerogenerador de velocidad variable que implementa un convertidor DC/AC completo de potencia, permitiendo la separación completa entre el generador y la red, para garantizar que la turbina pueda trabajar a una frecuencia distinta de la red cambiando su velocidad y aprovechando al maximo los picos de la variabilidad viento[17]. la conexión de la turbina eólica tipo 4 se muestra en la figura 3.5

La corriente de corto circuito va a estar limitada totalmente por la corriente limite del convertidor, por esta razón es normal encontrar convertidores de potencia para el aerogenerador tipo 4 con una sobre capacidad de corriente del valor nominal, note en la figura 3.5 que ante cualquier condición de falla el generador va a estar conectado al convertidor de potencia y protegido de fallas en las lineas de la red,

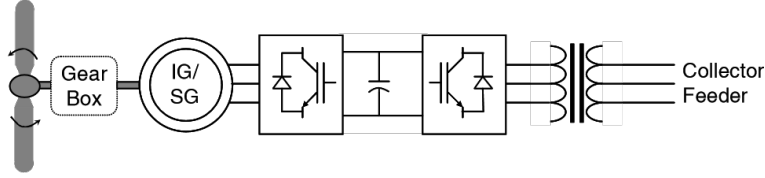


Figura 3.5: Conexión a la red del WTG tipo 4 [1]

sin embargo no se puede exceder el límite de corriente del convertidor de potencia con el fin de proteger los interruptores y evitar daño en el convertidor[19]

Según [16][19] los aerogeneradores tipo 4 en análisis de fallas se pueden representarse como una fuente trifásica de corriente constante balanceada, cuyo valor va a depender de la potencia nominal del convertidor y la tensión en terminales.

b. Análisis de ventajas y desventajas

Esta configuración tiene un máximo aprovechamiento del viento al momento de generar la energía eléctrica, sin embargo, tiene la característica que la capacidad de potencia del convertidor tiene que ser igual a la potencia nominal del aerogenerador, esto representa un mayor costo, además, el espacio requerido para la instalación del equipo es mucho mayor [18].

Teniendo en cuenta las características mencionadas de cada aerogenerador, se realiza una comparación de las características de cada uno, las cuales se muestra en la figura 3.6, con la finalidad de elegir el modelo a implementar.

Se llega a la conclusión de seleccionar el modelo tipo 3 ya que presenta mejor comportamiento ante varias pruebas de estabilidad y es ideal para la mayoría de aplicaciones a un bajo costo [18], también, se implementara el modelo tipo 4 debido a que tiene un máximo aprovechamiento de los picos de variabilidad del viento para ser mas eficiente en la generación de energía eléctrica, sus modelos serán mostrados y comparados con la información teórica disponible en el siguiente capítulo.

CARACTERÍSTICAS	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4
velocidad	Fija	Variable	Variable	Variable
control de velocidad	No tiene, es limitada por la frecuencia de la red, es decir la turbina gira a la velocidad de la red eléctrica.	Debido a su resistencia externa en el rotor su velocidad se puede controlar hasta un 10%.	Debido al convertidor DC-AC, la velocidad puede ser controlada en un rango del 25% al 30%.	Totalmente independiente de la frecuencia de la red, es decir que la turbina puede girar a una velocidad distinta aprovechando al máximo los picos de mayor energía del viento.
Conexión	conexión directa a la red.	Conexión directa del estator con la red eléctrica y el rotor se conecta a través de una Rext a la red.	Conexión directa del estator con la red y la conexión del rotor con la red es a través de un convertidor DC-AC con la red.	GI totalmente aislado de la red eléctrica a través de un convertidor completo DC-AC.
Magnitud de la Iscc	limitada por la impedancia entre el lugar de la falla y el GI, su valor puede llegar hasta 6 pu.	limitada por la Rext, entre más grande sea menor va hacer la magnitud.	Limitada por la Rcb y los parámetros del GI, principalmente de las inductancias.	completamente limitada por el convertidor de potencia y la tensión en los terminales.
Desventajas	En el arranque consume mucha potencia, esto hace necesario implementar dispositivos de compensación de reactivos.	Bajo control de velocidad, no aprovecha al máximo los picos de velocidad del viento.	No aprovecha al máximo la variabilidad del viento, debido al rango de control de velocidad.	la capacidad de potencia del convertidor tiene que ser igual a la potencia nominal del aerogenerador, lo que representa un mayor costo.
Ventajas	Debido a la conexión directa con la red, no emplea equipos de adecuación de frecuencia.	Respecto al tipo 1 tiene mejor aprovechamiento de la variación del viento.	Presenta el mejor comportamiento de estabilidad.	ante cualquier condición de falla el generador va a estar conectado al convertidor de potencia y protegido de fallas en las líneas de la red.

Figura 3.6: Comparación tipos de WTG

3.1.2. Fuentes fotovoltaica

Según [2] los paneles fotovoltaicos funcionan como una fuente generación distribuida con un interfaz de inversor (IIDG) para conectarlos a la red, es decir, para proporcionar energía eléctrica a la red se necesita una unidad de generación de potencia (panel solar) y un convertidor DC/AC, esta conexión se puede observar en la figura 3.7.

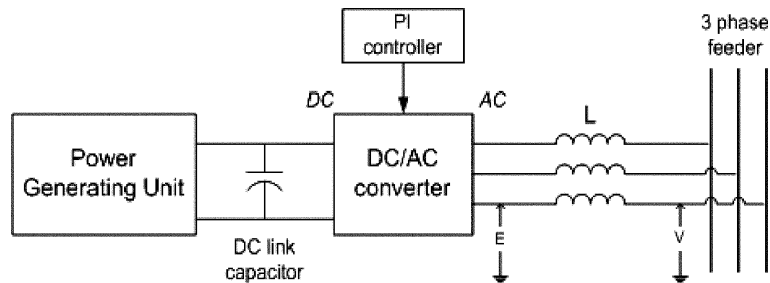


Figura 3.7: Elementos de la conexión de un PV [2]

Debido al condensador DC que se observa en la figura 3.7 el voltaje de salida DC permanecerá casi constante durante un transitorio, por lo tanto, se puede asumir un voltaje de entrada constante en el convertidor, por esta razón durante un transitorio la respuesta del IIDG dependerá principalmente del control que se ejerza sobre este [2][20].

Para análisis de fallas en sistemas de generación que requiera un IIDG, se puede utilizar la característica V-I para determinar la inyección de corriente proveniente de la fuente de generación, por lo tanto las IIDG pueden ser modeladas como fuentes de corriente controladas, donde su magnitud depende de la potencia del convertidor y el voltaje del PCC (punto en común de acoplamiento) y su comportamiento es el que muestra la figura. 3.8 [3][24].

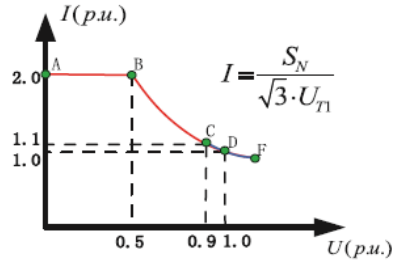


Figura 3.8: Comportamiento de la corriente inyectada por el sistema PV en falla [3]

Según [3] para una falla lejana la contribución de corriente de un sistema fotovoltaico no va a exceder el rango de corriente límite establecida por el convertidor, por lo tanto, va a entregar al sistema su valor rms de corriente en condiciones normales. Esta magnitud está definida por la ecuación 3.5.

$$I_{cc} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{t1}} \quad (3.5)$$

Donde la magnitud de la corriente esta en función de:

S_N : Potencia aparente del convertidor.

V_{VT1} : Voltaje rms de secuencia positiva del PCC

Por otro lado, para fallas cercanas se debe tener en cuenta el limite de corriente que se establece en el controlador del inversor para evitar daños en convertidor; una buena aproximación es establecer esta corriente limite a 2 veces el valor de la corriente en el IIDG[3][24]. Otro factor que afecta la contribución de la corriente de corto circuito del sistema PV, es el esquema de protección empleado para el IIDG [20], por lo tanto el comportamiento de esta corriente esta dado por la ecuación descrita en 3.6 dependiendo de la tension en terminales del sistema PV y la potencia del convertidor.

$$I_{DG}(S_N, U_{T1}) = \begin{cases} \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{T1}} \cdot e^{j\angle(U_{T1})} & \text{si } U_{T1} \geq 0,9 \cdot U_N \\ \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{T1}} \cdot (e^{j\angle(U_{T1}) - \frac{\pi}{2}}) & \text{si } 0,9 \cdot U_N \geq U_{T1} \geq 0,5 \cdot U_N \\ 2 \cdot I_N \cdot e^{j\angle(U_{T1}) - \frac{\pi}{2}} & \text{si } 0,5 \cdot U_N \geq U_{T1} \end{cases} \quad (3.6)$$

Donde:

S_N : Es la potencia aparente de la fuente de GD.

$\angle U_{T1}$: Es el angulo del voltaje de secuencia positiva de la fuente de generación en el PCC.

I_N : Es la corriente nominal de la fuente de GD.

V_N : Es el voltaje linea a linea de la fuente de generación.

Esta ecuación expresa que cuando la magnitud de tensión de secuencia positiva es mayor que 0.9 veces el voltaje nominal del IIDG, la corriente que inyecta la fuente de generación es totalmente activa, por lo tanto, la corriente y la tensión están en fase y cuando está entre 0.9 y 0.5, la corriente es totalmente reactiva, lo que significa que está desfasada respecto a la original, por último, nos dice que cuando esta tensión de secuencia positiva baja más de 0.5, la corriente se limita a 2 veces la nominal del convertidor, con el objetivo de evitar daños en el.[3][24].

En conclusión, la magnitud de esta corriente inyectada por la DG va a depender de la capacidad del método de control aplicado, la tension en terminales de la fuente, el tipo de falla que ocurra y la localización de esta. Este modelo de panel fotovoltaico será implementado en simulink debido a que los sistemas fotovoltaicos actualmente disponen de un interfaz de convertidor para conectarse a la red eléctrica y será comparado con

la información teórica disponible en el siguiente capítulo.

3.1.3. Micro hidroeléctricas

Un sistema de micro generación hidroeléctrica es un sistema de velocidad variable que necesita un interfaz de electrónica de potencia (IIDG) para conectarse a la red o para alimentar una carga en modo isla o mico red [22][20].

Según [25] este tipo de generación tiene muchas similitudes con los sistemas eólicos y se implementan las mismas topologías. Las características, ventajas y desventajas de cada una están explicadas anteriormente, al igual que el comportamiento de la corriente inyectada por cada una de ellas ante una perturbación.

Para este tipo de generación con micro hidroeléctricas se llega a la misma conclusión propuesta para los aerogeneradores, en la cual se decide implementar las topologías tipo 3 y tipo 4, donde el comportamiento de la corriente del tipo 3 ante una perturbación está descrito por las ecuaciones mencionadas para los aerogeneradores y el comportamiento del tipo 4 es el mismo que para los sistemas fotovoltaicos, por su interfaz de inversor para conectarse a la red, por lo tanto, se mostrarán los modelos en el siguiente capítulo que serán los mismo de los aerogeneradores y de los sistemas fotovoltaicos.

3.2. Elemento 2: Líneas de transmisión

Cuando se va a trabajar con líneas de transmisión se debe tener en cuenta la longitud de la línea, que es la encargada de determinar el modelo que se implementará para una simulación en cualquier aplicación. Las líneas de transmisión se pueden clasificar en tres modelos [26].

3.2.0.1. Modelos línea corta

Son líneas menores a 80Km, este modelo es usado para elementos simples de parámetros concentrados y consiste en un acople en serie R-L por fase para representar la línea como se observa en la figura 3.10 [26].

3.2.0.2. Modelo de línea media

Se considera línea media cuando su longitud esta entre 80 y 240Km.

3.2.0.3. Modelo de línea larga

Se considera línea larga cuando su longitud es superior a 240km.

En estos dos últimos modelos el efecto capacitivo empieza a tener un papel muy importante en el modelado y no se puede despreciar, por lo tanto suelen ser representadas por un circuito π , en la cual la admitancia total en derivación Bs de la línea se divide en dos partes iguales ubicados en el extremo de envío y recepción de la línea con el acople en serie RL. Las líneas de transmisión son, normalmente, operadas con cargas trifásicas balanceadas. Aunque las líneas no están espaciadas equilateralmente y no se transponen, la asimetría resultante es leve y las fases se consideran equilibradas y sus parámetros son modelados como distribuidos a lo largo de su longitud [27], este modelo se puede ver en la figura .

Por esta razón es importante conocer la distancia de la línea que se va a simular y así elegir el modelo adecuado para la aplicación que se desea.

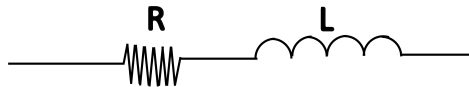


Figura 3.9: Representación RL de línea de transmisión

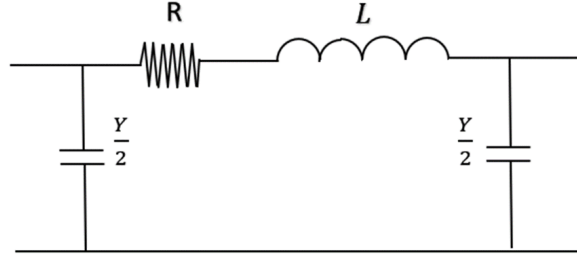


Figura 3.10: Representación PI de línea de transmisión

En una micro red existen dos formas de operación, la primera cuando está conectada a la red principal y la segunda es en modo autónoma (isla), es decir, las fuentes de generación distribuidas suplen la demanda del sistema de distribución. Según [23] cuando ocurre esta transición, la frecuencia varía en un rango de [57-60.5]Hz dependiendo del balance de potencia que se tenga entre DGs y cargas. Las fuentes DGs deben regresar la al rango normal de operación, el cual es de 59.3 a 60.5Hz.

En [23] se menciona que si antes de pasar al modo isla, la generación total de las DGs es menor que la demanda de las cargas de la micro red, la creación de la micro red autónoma resultaría en una reducción de frecuencia y viceversa.

Teniendo en cuenta que la variación de la frecuencia de una micro red depende del balance de potencias, se tiene los siguientes modelos de carga:

3.3. Elemento 3: Cargas

Según [28] en una micro red la mayoría de cargas son CPL, es decir cargas que requieren de un valor constante de potencia. Durante una falla el voltaje del sistema cae, debido a que la potencia se mantiene constante la corriente se va a incrementar, evidentemente esto genera un impacto en el sistema y es esencial el modelamiento preciso de este elemento.

3.3.0.1. Cargas residenciales, industriales y comerciales

En un sistemas de distribución con fuentes de generación distribuidas, usualmente las cargas son residenciales, industriales y comerciales, las cuales son modelos dependientes

del voltaje y se expresan matemáticamente mediante las ecuaciones 3.7 y 3.8, donde α y β son constantes definidas para cada tipo de carga y se muestran en la figura 3.11. También, las cargas constantes se pueden modelar con esta ecuación con valores de α y β iguales a cero [4]. Después de obtenidos los datos estas se pueden representar mediante los datos de potencia activa y reactiva.

Load Type	α	β
Constant	0	0
Industrial Load	0.18	6.00
Residential	0.92	4.04
Commercial	1.51	3.40

Figura 3.11: Parámetro del modelo de carga dependiente de voltaje [4]

$$P_i = P_{oi} \cdot V_i^\alpha \quad (3.7)$$

$$Q_i = Q_{oi} \cdot V_i^\beta \quad (3.8)$$

Donde:

P_i y Q_i : son la potencia activa y reactiva en el nodo i .

P_{oi} y Q_{oi} : son las potencias de operación en el nodo i .

V_i : es el voltaje en el nodo i .

α y β : son los exponentes de potencia activa y reactiva.

Por otra parte, en [29] dicen que una carga dinámica se puede representar como fuente de corriente controlable donde la potencia de una carga es constante y la corriente es $I = \frac{P}{V}$, por esta razón se puede modelar como una fuente de corriente controlable. También, según [23] las cargas constantes pueden ser representadas por una conexión serie de una resistencia y una inductancia como se indica en la figura 3.10.

3.3.0.2. Cargas electrónicas

Este tipo de cargas utilizan una amplitud y frecuencia diferentes a la de la red eléctrica, como los equipos informáticos, cargadores de baterías e iluminación. Para convertir la tensión CA de la red, primero debe rectificarse y luego convertirse a la forma de onda de la tensión deseada. Las cargas electrónicas de acuerdo con su función principal se pueden dividir en dos grupos:

a. Fuente de alimentación:

Según mediciones de estudio de transitorios realizados en [30] con diferentes tipos de cargas para fuentes de alimentación electrónica como de computadoras, monitores, cargadores de baterías, teléfono IP y un receptor satelital. Muestran que cuando el voltaje disminuye, la corriente cae a cero durante un corto tiempo y luego aumenta a un nuevo valor de estado estable. El esquema eléctrico de este tipo de carga es el mostrado en la figura 3.12, el cual indique que cuando el voltaje de suministro se vuelve más bajo que el voltaje sobre el capacitor, los diodos bloquean la corriente de suministro y la carga toma energía del capacitor. Cuando la tensión del condensador es menor que la tensión de alimentación, la corriente de alimentación comienza a aumentar al nuevo valor de estado estable. Dado que el voltaje ahora es más bajo, la corriente debe ser más alta ya que la carga tiene la característica de potencia constante.

El modelo transitorio de las fuentes de alimentación es un rectificador de diodo, un circuito RLC y la característica de carga. La característica de carga en la mayoría de los casos puede determinarse a partir de la potencia nominal, pero el circuito RLC requiere mediciones, en este estudio determinaron los parámetros para ciertas cargas los cuales se muestran en los anexos A.

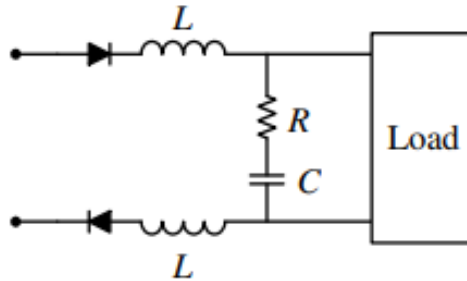


Figura 3.12: Parámetro del modelo de carga de fuente de alimentación [30]

b. Aparatos de iluminación:

B. Aparatos de iluminación Para dispositivos de iluminación cada vez mas se está utilizando la electrónica con el fin de aumentar la capacidad de control de la lampara, como por ejemplo en el caso de lámparas fluorescentes regulables y lámparas fluorescentes para iluminación de emergencia.

Según los estudios realizados en [30] estos aparatos de iluminación se clasifican en dos: lámparas fluorescentes compactas y balastos de alta frecuencia, para la primera concluyeron que tienen una característica de carga constantes, Las lámparas fluorescentes compactas mostraron la característica CC, que junto con el circuito RC se debe calcular a partir de las mediciones estos parámetros de muestran en el Anexo B. Para iluminación de emergencia (balastos de alta frecuencia) determinaron que para casos de bajo voltaje tiene un comportamiento de corriente constante, en este último no fue posible realizar un modelo transitorio con un circuito eléctrico, pero la respuesta transitoria se podría describir mediante una expresión matemática de un sistema de segundo orden con una oscilación amortiguada.

Capítulo 4

Implementación de los modelos de fuente analizados

En este capítulo se mostrarán las simulaciones de los modelos seleccionados anteriormente para cada fuente de generación distribuida, el resultados del comportamiendo de la corriente ante fallas y la validación respecto a las referencias citadas.

4.1. Implementación del modelo de WTG y micro-hidroeléctrica tipo 3 ante perturbación

Después de analizar diferentes características de los tipos de aerogeneradores y micro-hidroelectricas que se utilizan actualmente, como de operación, costo, funcionamiento y tamaño. Se decido implementar el modelo tipo 3 para aerogeneradores y microhidroelectricas, debido a que este modelo garantizan mayor estabilidad al sistema de distribucion a un menor costo.

Este modelo, descrito en la ecuación 3.3 define el comportamiento de la corriente de falla. Este valor de corriente depende principalmente de los parámetros del generador de inducción, los cuales se definen en la tabla 4.1. Esta ecuación es simulada en el software simulink mediante el uso de generador de inducción, utilizando una turbina de 3MVA de potencia y un voltaje base de 960[v] linea a linea. También, se emplea el elemento "matlab function", con el cual se logra obtener la corriente de falla inyectada por la fuente y ver reflejada su influencia en un sistema de distribucion.

32CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE FUENTE ANALIZADOS

En la salida de la "Matlab function" se obtiene los valores de corriente de falla de cada fase, los cuales se conectan como entrada a una fuente de corriente controlada, para luego ser conectada al sistema de distribución y simular el comportamiento de la corriente inyectada en caso de una falla, este modelo se puede observar en la figura 4.1.

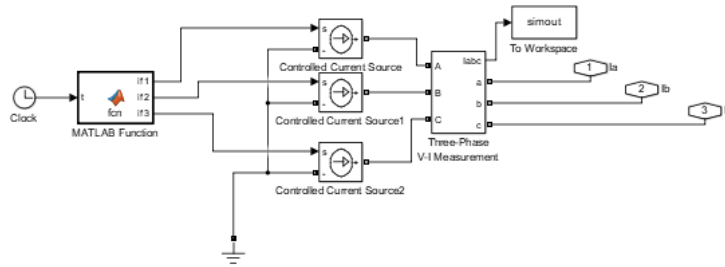


Figura 4.1: modelo en simulink del WTG3

Parametros	Definición
Vs	0.58
Vr	0.23
Xso	0.07
Xro	0.17
Xm	3.30
Rs	0.007
Rr	0.005
Rcb	0.04
Lso	0.00018568
Lro	0.000450939
Lm	0.00875321

Tabla 4.1: Parámetros del GI

La simulación del comportamiento de la corriente de las tres fases ante perturbaciones se presenta en la figura 4.2. donde se ingresan los parámetros reales del GI en la ecuación 3.3.

4.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE WTG Y MICROHIDROELÉCTRICA TIPO 3 AN

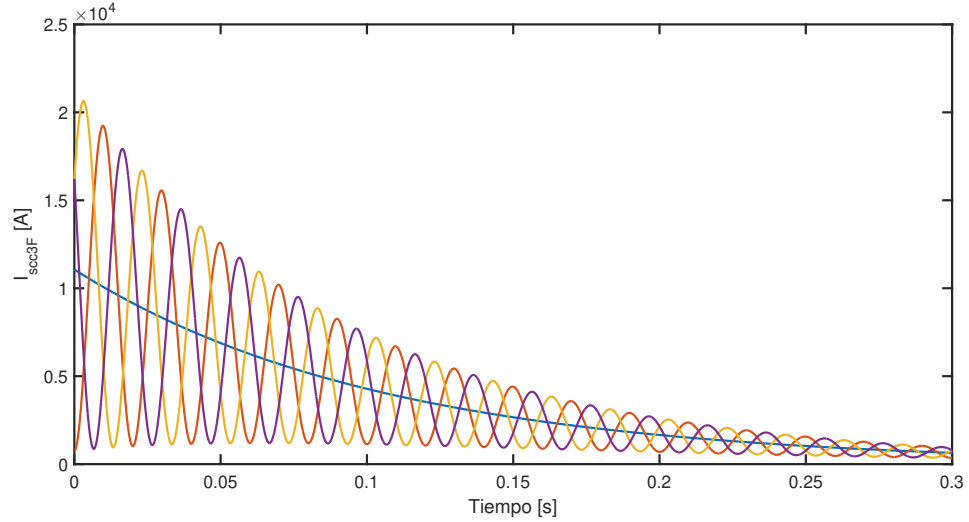


Figura 4.2: Simulación corriente de falla tipo 3

Para verificar el comportamiento de la corriente en la figura 4.2, se pasaron los datos reales obtenidos a valores en pu, está gráfica se presenta en la figura 4.3 (a) y se tomo la gráfica de una sola fase, con la finalidad de compararla con la gráfica tomada de [17] mostrada en la figura 4.3 (b).

En la figura 4.3 se puede observar la magnitud y forma de onda de la señal oscilatoria (gráfica azul) donde se el nivel de corriente y el compotaminiento que presenta la corriente durante una falla, la cual tiene un valor máximo (punto verde) de 6[pu] y la componente DC (gráfica roja) que tiene un valor máximo de 3.5[pu] (punto verde), que su tiempo de caída depende del tiempo contante del rotor.

La dos gráficas mostradas en la figura 4.3 presentan un comportamiento similar de la corriente inyectada ante una falla, tanto la parte oscilatoria como la DC.

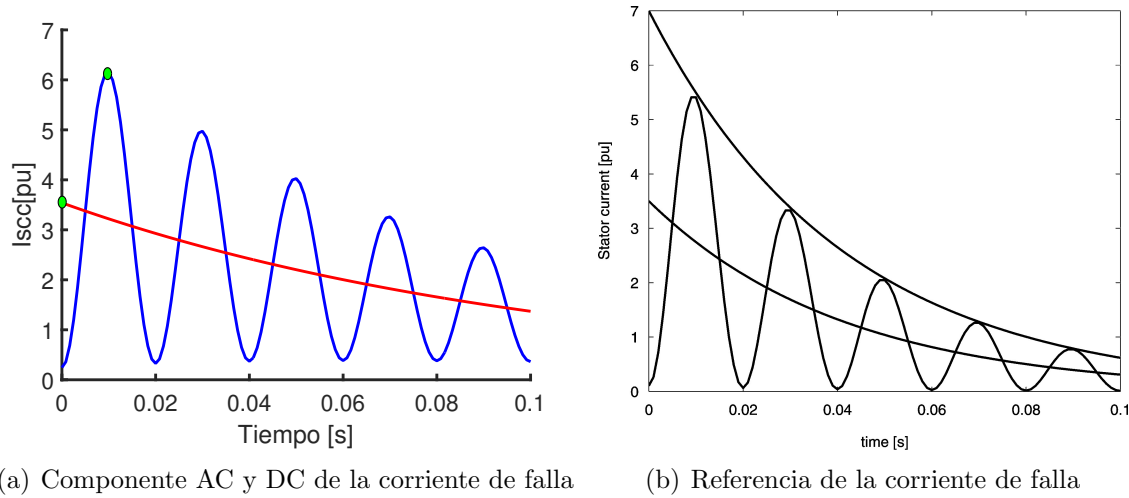


Figura 4.3: Comparación del comportamiento de la corriente de falla

4.2. Implementación del modelo de un IIDG ante perturbación

Para aerogeneradores, micro hidroeléctricas tipo 4 y paneles fotovoltaicos el modelo implementado es el mismo, ya que cuenta con un interfaz de inversor para conectarse a la red eléctrica, este modelo se muestra en la figura 4.4. La corriente que inyectan este modelo durante una falla va a depender del valor límite de corriente escogido en el control del convertidor, que según [3][24] es 2 veces la corriente nominal del convertidor y del voltaje de secuencia positiva en sus terminales.

Este modelo es implementado en simulink donde se mide los datos de tensión en terminales de la fuente DG que están conectados a la red eléctrica. Posteriormente, se selecciona la secuencia positiva del voltaje para ser utilizados en la ecuación 3.8 implementada en la "Matlab function", que describe el comportamiento de la corriente entregada por la fuente durante una falla. La salida de este bloque son los valores de las corrientes de las tres fase que inyecta la fuente DG a la red en el momento de una falla.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE UN IIDG ANTE PERTURBACIÓN35

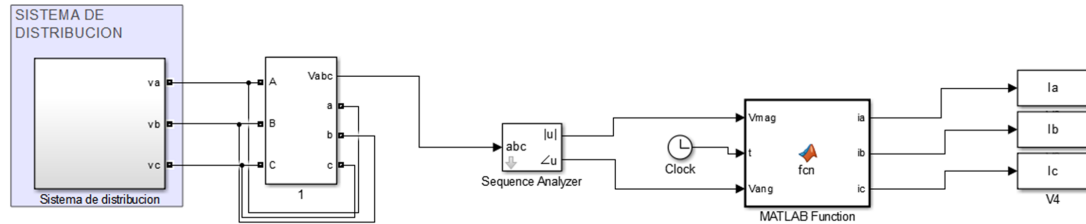


Figura 4.4: Modelo para una DG con interfaz de inversor

La simulación de las corrientes de las tres fase da como resultado la siguiente forma de onda y magnitud, que se muestra en la figura 4.5.

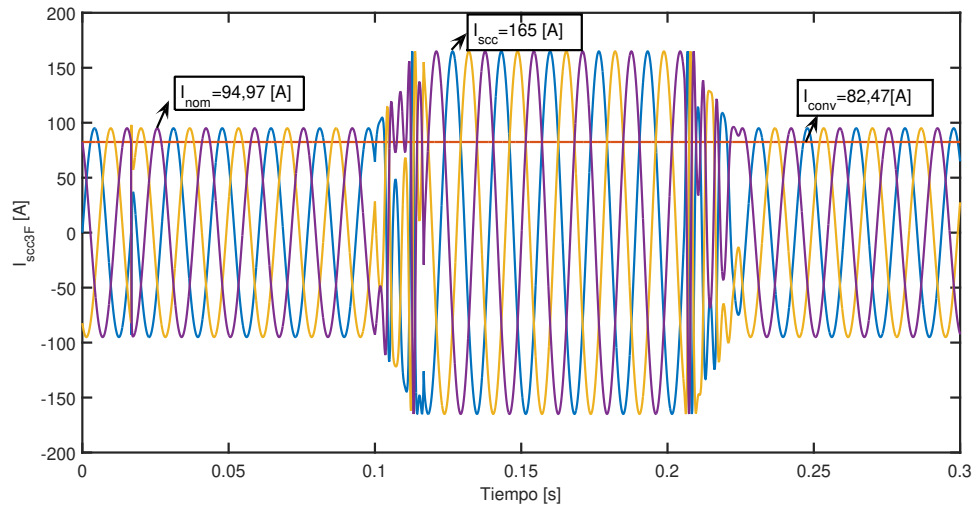
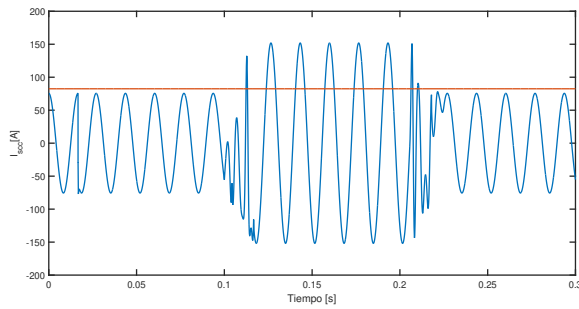


Figura 4.5: Corriente inyectada por una DG en falla

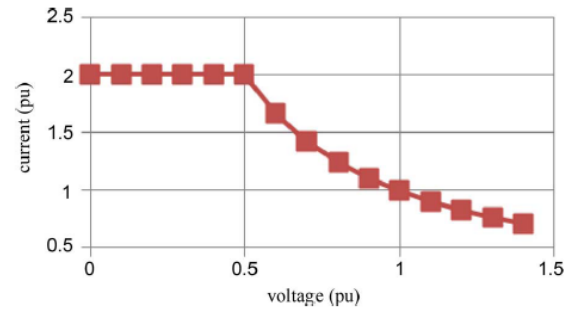
Donde, la corriente normal que entrega la fuente es 94,97 [A], al momento que se aplica una falla en $t=0.1[s]$, aumenta a un valor de 165[A] y comparándola con la corriente máxima que puede entregar el convertidor (82,47[A]), se puede observar que tiene un aumento de aproximadamente dos veces. La tensión en condiciones normales tiene un valor de 3465[v] y en el momento de la falla baja a 1724[v], La cual es menor a 0.5 veces

la tension nominal del convertidor que para esta simulación se tomo un valor de 3500[v].

Para verificar el comportamiento de la corriente de la figura 4.5, se simula una sola fase de la corriente en simulink, esta se puede observar en la figura 4.6 (a), la cual muestra dos gráficas, una de color rojo que representa la corriente nominal del convertidor cuyo valor es 82,47[A] y la azul representa la corriente entregada por la fuente DG. En este caso, se produjo una falla $t=0.1[s]$ hasta $t=0.2[s]$, Con el fin de compararla con la figura 4.6 (b) tomada de [21], donde se observa que aunque se emplearon sistemas de prueba diferente la corriente tiene el mismo comportamiento ante una perturbación. El tiempo que se demora en despejarse la falla cae de manera exponencial dependiendo del esquema de protección utilizado en la fuente DG.



(a) Corriente de falla de un IIDG



(b) Referencia de la corriente de falla de un IIDG

Figura 4.6: Comparación del comportamiento de la corriente de falla de un IIDG

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE UN IIDG ANTE PERTURBACIÓN37

También, se puede ver el comportamiento de la tension durante la falla mostrado en la figura 4.7, la cual cae por debajo de 0.5 la tension nominal del convertidor durante la falla y en consecuencia la corriente va a estar limitada como lo indica la ecuación 3.6.

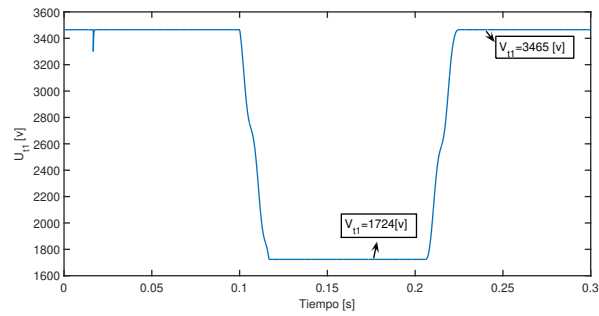


Figura 4.7: Voltaje de falla

Capítulo 5

Conclusiones

A partir de los documentos analizados en el presente trabajo se concluye que el tipo de aerogenerador y micro hidroeléctrica mas adecuado para la implementación en la industria, independiente de su aplicación, es el tipo 3, debido a que éste genera mayor estabilidad en el sistema, mayor aprovechamiento de los picos de variabilidad del viento a menor costo. Por esta razón fue utilizado para realizar el modelo ante fallas, que es representado por ecuación 3.3 descrita en el capítulo 3, con el cual se obtiene el comportamiento esperado de la corriente. Este modelo depende principalmente de las inductancias del generador utilizado, entonces para el modelamiento de aerogeneradores y micro hidroeléctricas tipo 3 se emplea una fuente de corriente controlada con un valor de entrada igual al resultado de la ecuacion 3.3.

Según los documentos analizados, el aerogenerador tipo 4 es el que tiene un mayor aprovechamiento de los picos de variación del viento gracias al convertidor completo que emplea para conectarse a la red eléctrica. Esto permite que el funcionamiento de la turbina sea totalmente independiente de lo que ocurra en la red eléctrica permitiendo que la velocidad de la turbina gire a una frecuencia diferente .

Las fuentes de generación que emplean un interfaz de inversor para conectarse a la red eléctrica como los paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y microhidroelectricas con la topología tipo 4. El modelo para fallas puede ser representado mediante una fuente controlable de corriente con un valor igual al descrito en la ecuación 3.6 que depende de la potencia del convertidor y la tensión en terminales de la fuente DG.

Los modelos de lineas de transmisión se definen de acuerdo al tamaño de la línea que

se va a implementar. Si su longitud es menor a 80 km se usa el modelo de parámetros concentrados y si es mayor el de parámetros distribuidos.

En una microred, las cargas que se implementan usualmente son residenciales, comerciales e industriales, las cuales se modelan como una carga PQ utilizando el modelo de voltaje independiente para hallar estos valores de potencia, una vez encontrados se pueden modelar como una conexión en serie RLC. También, existen cargas electrónicas que dependiendo si son tipo fuente de alimentación o dispositivos de iluminación, se modelan con un rectificador de diodos y un circuito RLC o una expresión matemática de un sistema de segundo orden con una oscilación amortiguada respectivamente. Un último tipo de carga que puede tener una micro red es una donde la potencia o corriente sean constantes y esta se pueden modelar como una fuente de corriente.

Apéndice A

Parámetros de los modelos de carga de fuente de alimentación

Las tablas mostradas en este anexo fueron sacadas del estudio realizado del documento [30] sobre el modelo de cargas electrónicas durante fallas, este modelo tiene en cuenta las características de carga (potencia y tensión de operación) y un circuito RLC de carga que funcionan como fuente de alimentación y uno RL para las cargas de iluminación. Para hallar los parámetros de estos circuitos se necesitan mediciones de la corriente, que se obtuvieron en este estudio con el fin de hallar los valores R , L y C de los modelos.

42APÉNDICE A. PARÁMETROS DE LOS MODELOS DE CARGA DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Parametros del modelo de carga tipo fuente de alimentación					
Carga	Prated [W]	Vrated [V]	Model	Error [%]	Parametross
Chieftech computer power supply	350	200-380	U ² /40	20	R=7Ω L=25mH C=350uF
Dell computer power supply	unknow	170-380	U ² /43,5	1,5	R=10Ω L=1mH C=230uF
Macintosh computer power supply	87	150-380	U ² /43,5	4	R=10Ω L=0,1mH C=230uF
Sirtech computer power supply	235	180-380	U ² /37,9	20	R=10Ω L=25mH C=350uF
Ericson battery charger	unknow	100-300	U ² /6,7	8	R=100Ω L=2mH C=10uF
Ericson battery charger	unknow	100-301	U ² /6,9	4,3	R=100Ω L=2mH C=10uF
Ericson battery charger	unknow	100-302	U ² /8,05	20	R=100Ω L=2mH C=10uF
IP Telephone (Grandstream)	unknow	100-380	U ² /22,76	24	R=150Ω L=1mH C=11uF
LCD (Monitor)	32	100-303	U ² /30	1,2	R=100Ω L=1mH C=70uF
Monitor (NCD)	unknow	200-350	U ² /84	3,8	R=1Ω L=0,2mH C=300uF
Satellite receiver (Triasat)	unknow	200-350	U ² /16,6	4,8	R=50 L=2mH C=50uF

Parametros de los modelo de carga usados para iluminacion					
Carga	Prated [W]	Vrated [V]	Model	Error	Parametross
Eurolight	9	180-300	U ² /0,020	7,5	R=200Ω L=0mH C=3,5uF
Ikea	11	190-380	U ² /0,038	2,1	R=300Ω L=0mH C=2,7uF
Osram	23	120-300	U ² /0,067	10	R=300Ω L=0mH C=4,7uF
Philip	9	120-300	U ² /0,035	1,2	R=100Ω L=0mH C=3,3uF
Philip	11	120-300	U ² /0,041	4,3	R=100Ω L=0mH C=12uF
Philip	15	140-280	U ² /0,057	15	R=200Ω L=0mH C=4,7uF
Sylvania	10	100-300	U ² /0,046	1,1	T=0,150s L=0mH C=4,7uF
Philip	72	150-220 220-280	U ² /0,325 U ² /70,5	1,2 6,8	T=0,150s L=100mH C=0,5uF
Tridonic	72	130-340	U ² /75	—	—
Tridonic (Dimmable)	70,4	110-380	U ² /58,1	—	—

Apéndice B

Parámetros generador de inducción

Parametros del generador de inducción			
Parametros	Valor [pu]	Parametros	Valor [pu]
Vs	0,58	Rs	0,007
Vr	0,23	Rs	0,005
Xso	0,07	Rcb	0,004
Xro	0,17	Frecuencia [Hz]	60
Xm	3,3	Sbase [3MVA]	3
		Vbase [V]	960

Apéndice C

Parámetros convertidor del *IIDG*

Convertidor IIDG	
S_{nominal}	500e3 [VA]
V_{nominal}	270 [V]

Bibliografía

- [1] E. Camm, M. Behnke, O. Bolado, M. Bollen, M. Bradt, C. Brooks, W. Dilling, M. Edds, W. Hejdak, D. Houseman, *et al.*, “Characteristics of wind turbine generators for wind power plants,” *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009.
- [2] M. E. Baran and I. El-Markaby, “Fault analysis on distribution feeders with distributed generators,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005.
- [3] B. He, K. Jiang, D. Lin, S. Shen, D. Lin, P. Hu, and H. Wang, “An adaptive protection scheme for distribution systems with dgs based on optimized thevenin equivalent parameters estimation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015.
- [4] D. Singh, D. Singh, and K. S. Verma, “Multiobjective optimization for dg planning with load models,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 427–436, Feb 2009.
- [5] S. E. A. Esmaeili and H. Hojabri, “Short-circuit level control through a multi-objective feeder reconfiguration using fault current limiters in the presence of distributed generations,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2016.
- [6] G. O. S. M. G. Molina and P. E. Mercado, “Improving the integration of wind power generation into ac microgrids using flywheel energy storage,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012.
- [7] H. Gers J.M, “Protection of electricity distribution networks,” *IET*, 2011.
- [8] B. S. Tekpeti, X. Kang, and X. Huang, “Fault analysis of solar photovoltaic penetrated distribution systems including overcurrent relays in presence of fluctuations,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 100, pp. 517–530, 2018.

- [9] B. S. T. X. Kang, C. E. K. Nuworklo and M. Kheshti, "Protection of micro-grid systems: a comprehensive survey,," *The Journal of Engineering*, 2017.
- [10] S. Chandrasekar and R. Gokaraju, "Dynamic phasor modeling of type 3 dfig wind generators (including ssci phenomenon) for short circuit calculations," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2015.
- [11] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter, "Microgrid protection," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007.
- [12] J. M. T. Kauffmann; U. Karaagac; I. Kocar; S. Jensen and E. Farantatos, "An accurate type iii wind turbine generator short circuit model for protection applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017.
- [13] S. P. S. Nanot, "modeling of a pv system with grid code compatibility," *Electric power systems research*.
- [14] R. M. M. D. A. G. G. Ledwich and F. Zare, "Control and protection of a microgrid connected to utility through back-to-back converters," *Electrical power systems research*.
- [15] J. A. N. V. E. V. G. A. Mendoza, M. Cisneros and K. Gurubel.TUN, "Dynamic phasors modeling for a single phase two stage invertir," *Electrical power systems research*.
- [16] E. Muljadi and V. Gevorgian, "Short-circuit modeling of a wind power plant," *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [17] J. Li, S. Pasupulati, N. Samaan, E. Muljadi, and V. Gevorgian, "Different factors affecting short circuit behavior of a wind power plant," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2012.
- [18] E. E. Valencia, *ANALISIS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA CONSIDERANDO ALTA PENETRACION DE GENERACION EOLICA*. PhD thesis, Universidad Tecnologica de Pereira, 2016.
- [19] J. Morren and S. W. de Haan, "Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007.

- [20] I. N. Z. Qianggang Wang, Student Member and L. Ye, “Fault analysis for distribution networks with current-controlled three-phase inverter-interfaced distributed generators,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 2015.
- [21] S. Wall, “Performance of inverter interfaced distributed generation,” *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)*, 2002.
- [22] S. Nababan, E. Muljadi, and F. Blaabjerg, “An overview of power topologies for micro-hydro turbines,” *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2012.
- [23] F. Katiraei, M. Iravani, and P. Lehn, “Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources,” *IET generation, transmission & distribution*, vol. 1, no. 3, pp. 369–378, 2007.
- [24] H. Hooshyar and M. E. Baran, “Fault analysis on distribution feeders with high penetration of pv systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013.
- [25] M. Andreica, S. Bacha, D. Roye, I. Exteberria-Otadui, and I. Munteanu, “Micro-hydro water current turbine control for grid connected or islanding operation,” *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008.
- [26] A. Gopalakrishnan, M. Kezunovic, S. M. McKenna, and D. M. Hamai, “Fault location using the distributed parameter transmission line model,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, pp. 1169–1174, Oct 2000.
- [27] S. A. and, “Modeling of transmission line faults for transient stability analysis,” in *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1–5, Sep. 2017.
- [28] N. Bayati, A. Hajizadeh, and M. Soltani, “Accurate modeling of dc microgrid for fault and protection studies,” in *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [29] J. Tianjun, R. Rui, and Y. Minghao, “Modeling and simulating on micro grid with household dg,” in *2008 China International Conference on Electricity Distribution*, IEEE, 2008.
- [30] D. Nilsson, *DC Distribution Systems*. PhD thesis, Division of Electric Power Engineering Department of Energy and Environment CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2005.